бований при разработке исполнительных органов систем ориентации (СО) космических аппаратов является проведение механического анализа конструкции [2, 3].

Механический анализ – это прочностной анализ конструкции методом конечных элементов, наиболее распространенным и эффективным на сегодняшний день методом прочностного расчета.

Работа предусматривала создание математической конечно-элементной модели и проведение механического анализа конструкции исполнительного органа, состоящего из блока механики (БМ) и блока автоматики (БА). Было предусмотрено проведение механического анализа как отдельно для БМ и БА, так и для всего прибора в сборе.

Механический анализ включает в себя [4, 5]:

– создание математической конечно-элементной модели конструкции прибора (трехмерная геометрическая модель, конечно-элементная модель, модель механического поведения материалов, из которых изготовлены элементы конструкции);
– непосредственно проведение механического анализа, который включает в себя определение собственных часто и форм колебаний, расчет критических случаев нагружения, анализ механического поведения элементов конструкции.

Первым этапом работы было создание трехмерной геометрической модели конструкции БМ и БА. Это осуществлялось с использованием программных продуктов T-Flex CAD 3D и ANSYS. Необходимо отметить сложность геометрических форм БМ и БА, особенно БМ, имеющих множество мелких деталей, фасок, выемок и тому подобных «мелочей». Поэтому построение 3D-моделей оказалось непростой и трудоемкой процедурой.

конструктивных элементов БМ и БА использовались тетрагональные 10-узловые конечные элементы типа Solid-187.

При выполнении механического анализа проводился анализ сходимости численных результатов при различных способах представления элементов конструкций в виде конечных элементов. «Истинным» считался результат, соответствующий конечно-элементной модели с максимальным числом конечных элементов, уменьшение которого приводит к изменению основных значений расчетных параметров не более чем на 1...2 %.

На рис. 1 приведены конечно-элементные модели основных элементов конструкций БМ и БА.

Третьим этапом было создание модели механического поведения материалов, из которых изготовлены элементы конструкции.

В табл. 1 приведены принятые значения основных параметров, характеризующие свойства этих материалов.

Первой и основной процедурой механического анализа, без которой невозможно проведение других видов анализа, является модальный анализ, который предназначен для определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкций. Знание собственных частот необходимо при конструировании деталей и узлов, чтобы избежать их возбуждения на одной из собственных частот в процессе эксплуатации.

Модальный анализ проводился как для отдельных конструктивных элементов БМ и БА, так и для блоков в сборе.

В табл. 2 и 3 приведены расчетные собственные частоты колебаний для элементов конструкции БМ и БА и блоков в сборе.

Суммируя формулы (6) и (8) и вводя известные значения теплофизических величин, получим аналитическую зависимость скорости плавления проволоки от режимов сварки:

$$V_{пл.} = 1,33 \cdot 10^{-7} \frac{I \cdot U}{d^2} + 7,56 \cdot 10^{-10} \frac{I^2 \rho l}{d^4}.$$

При несоблюдении условия (1) процесс сварки не будет стабильным, т.к. при:

1. $t_п < \frac{\lambda}{V_{пл}}$ процесс сварки будет прерывистым из-за возможности обрыва дуги;
2. $t_п > \frac{\lambda}{V_{пл}}$, в этом случае скорость подачи проволоки будет выше скорости ее плавления.

2) Для сообщения капле расплавленного электродного металла необходимых значений скорости и ускорения, т.е. реализации стабильного переноса металла в сварочную ванну необходимо выполнить условие [5]:

$$t_и = 2\sqrt{\frac{2\lambda}{a}}, \qquad (9)$$

где a – ускорение, сообщаемое капле, м/с^2.

Если соотношение (9) не выполняется, то при:

1. $t_и > 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{a}}$, сила инерции не сможет нарушить баланс сил, действующих на каплю, и она не перейдет в сварочную ванну, и при дальнейшем увеличении объема оторвется от торца электрода под действием силы тяжести, независимо от действия управляющего воздействия.
2. $t_и < 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{a}}$, при соударении с металлом сварочной ванны каплю под воздействием сил пинч-эффекта вытолкнет из зоны сварки, либо капля разобьется на более мелкие брызги вследствие превышения силой соударения сил поверхностного натяжения.

Ускорение a можно представить как:

$$a = \frac{V_о}{t_t},$$

где $V_о$ – скорость выходного звена задающего механизма в конце спуска, равное [3]:

$$V_o = \omega \frac{d_k}{2},$$

где d_k – диаметр кулачка (выполнение, рис. 2), м; t_t – время торможения, с, равное [5]:

$$t_t = \frac{1}{2} t_и.$$

Таким образом, формула (9) примет вид:

$$t_И = 76,39 \frac{\lambda}{nd_k},$$

где n – число оборотов электродвигателя.

Окончательно отношение (2) примет вид:

$$\frac{t_п}{t_и} = 76,39 \frac{V_{пл.}}{nd_k}. \qquad (10)$$

В таблице представлены значения параметров режима сварки, полученных с учетом зависимости (10).

Таблица. *Изменение режимов сварки с квазиволновым импульсным движением сварочной проволоки при изменении напряжения питания дуги при заданных начальных условиях: $\varphi_п/\varphi_о$=0,256; λ=1,6 мм*

n, об/мин	V, м/ч	I, А	U, В
3900	470	300	29,0
3700	440	290	28,5
3400	420	280	28,0
3200	400	270	27,5
3000	370	260	27,0
2800	340	250	26,5
2600	320	240	26,0
2400	290	230	25,5
2200	270	220	25,0
2100	250	210	24,5
1900	230	200	24,0

На практике отношение (10) является величиной постоянной, т.к. его изменение осуществимо только заменой кулачка, поэтому целесообразно проводить адаптацию частоты подачи импульсов к напряжению источника питания для стабилизации процесса сварки, т.к. при небольшом изменении напряжения происходит существенное изменение частоты вращения вала электродвигателя.

Выводы

1. Для регулировки процесса сварки при использовании механизма с квазиволновым движением проволоки целесообразно применение обратной связи по частоте вращения электродвигателя, т.к. частота подачи импульсов меняется даже при незначительном изменении напряжения сварочной дуги.
2. Для обеспечения стабильного процесса сварки соотношение между фазовыми углами подъема и опускания кулачка должно быть равно $\frac{t_п}{t_и} = 76,39 \frac{V_{пл.}}{nd_k}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федько В.Т. Дуговая сварка плавлением: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. – 241 с.
2. Волокитин Г.Г., Кузьменко Н.И., Филиппов В.Ф. Теория механизмов и механика машин: Учебное пособие / Под ред. В.Ф. Филиппова. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2000. – Ч. 2. – 173 с.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982. – 519 с.
4. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
5. Федько В.Т., Брунов О.Г., Крюков А.В. Импульсно-дуговая сварка с короткими замыканиями как частный случай сварки с импульсной подачей проволоки // Современные проблемы машиностроения: Труды II Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 8–10 декабря, 2004.